

**ДВА ТИПА ОТКЛИКА МАГНИТОСФЕРЫ В ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЯХ Psc НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С МЕЖПЛАНЕТНЫМИ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ****MAGNETOSPHERIC RESPONSE OF TWO TYPES IN Psc GEOMAGNETIC PULSATATIONS TO INTERACTION WITH INTERPLANETARY SHOCK WAVES****В.А. Пархомов***Байкальский государственный университет,  
Иркутск, Россия, pekines\_41@mail.ru***Н.Л. Бородкова***Институт космических исследований РАН,  
Москва, Россия, nlbor@mail.ru***А.Г. Яхнин***Полярный геофизический институт,  
Апатиты, Россия, yahnin@pgia.ru***Теро Райта***Геофизическая обсерватория Соданкюля,  
Соданкюля, Финляндия, tero.raita@sgo.fi***Б. Цэгмэд***Институт астрономии и геофизики АН Монголии,  
Улан-Батор, Монголия, tseg@iag.ac.mn***С.Ю. Хомутов***Институт космофизических исследований и распространения радиоволн, ДВО РАН,  
Паратунка, Камчатский край, Россия, hom@ngs.ru***А.Ю. Пашинин***Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, pash@iszf.irk.ru***В.Э. Чиликин***Байкальский государственный университет,  
Иркутск, Россия, drfreez@yandex.ru***А.А. Мочалов***Полярный геофизический институт,  
Апатиты, Россия, mochalov@pgia.ru***V.A. Parkhomov***Baikal State University,  
Irkutsk, Russia, pekines\_41@mail.ru***N.L. Borodkova***Space Research Institute RAS,  
Moscow, Russia, nlbor@mail.ru***A.G. Yahnin***Polar Geophysical Institute,  
Apatity, Russia, yahnin@pgia.ru***Tero Raita***Sodankylä Geophysical Observatory,  
Sodankylä, Finland, tero.raita@sgo.fi***B. Tsegmed***Institute of Astronomy and Geophysics AS Mongolia,  
Ulaanbaatar, Mongolia, tseg@iag.ac.mn***S.Yu. Khomutov***Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS,  
Paratunka, Kamchatskii Krai, Russia, hom@ngs.ru***A.Yu. Pashinin***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, pash@iszf.irk.ru***V.E. Chilikin***Baikal State University,  
Irkutsk, Russia, drfreez@yandex.ru***A.A. Mochalov***Polar Geophysical Institute,  
Apatity, Russia, mochalov@pgia.ru*

**Аннотация.** В статье на примере события 22.06.2015 приведены новые данные о наличии предвестника большого геомагнитного положительного импульса ( $\Delta SYM-H=110$  нТл), вызванного межпланетной ударной волной (МУВ) и развивающегося на фоне главной фазы магнитной бури. Предвестник зарегистрирован глобально в 18:33:27 UT на сети индукционных магнитометров. Он представляет собой цуг колебаний с падающей частотой, имеющий резонансную структуру в спектре в диапазоне 0.25–11 Гц, длительностью ~20 с. Не обнаружено значительных задержек сигналов в реализациях, полученных в далеко отстоящих обсерваториях узкополосной фильтрацией в четырех частотных диапазонах. Выдвинуто предположение, что импульс может возбуждаться в волноводе Земля — ионосфера импульсным электрическим полем, которое возникает в ионосфере при кратковременных процессах взаимодействия МУВ с магнитосферой.

**Ключевые слова:** положительный геомагнитный импульс, глобальный предвестник, широкополосный всплеск геомагнитных пульсаций, спектральная резонансная структура, резонатор Земля — ионосфера, ионосферный альфвеновский резонатор.

**Abstract.** Using the June 22, 2015 event as an example, we present new data confirming the presence of a precursor of the sudden magnetic impulse caused by a powerful interplanetary shock wave (ISW). The precursor in the form of a train of oscillations (broadband pulse) with a falling frequency in the range 0.25–11 Hz with a duration of ~20 s, which had a spectral resonance structure, was recorded globally by a network of induction magnetometers at 18:33:27 UT. No significant phase delays of the signals were detected in four frequency bands at widely spaced observatories. It is suggested that the impulse can be excited in the Earth — ionosphere waveguide by a pulsed electric field which occurs in the ionosphere due to the short-term impact of ISW on the magnetosphere.

**Keywords:** sudden magnetic impulse, global precursor, broadband burst of geomagnetic pulsations, spectral resonance structure, Earth — ionosphere resonator, ionospheric Alfvén resonator.

## ВВЕДЕНИЕ

Импульсное воздействие межпланетной ударной волны (МУВ) на магнитосферу происходит в течение короткого времени и вызывает ряд глобальных возмущений. Наиболее яркими и хорошо отождествимыми эффектами являются положительные и отрицательные магнитные импульсы, которые подразделяются на внезапные начала SSC (SSC\*) (sudden storm commencement) и внезапные импульсы SI (SI\*) (sudden impulse). Обозначение \* используется в случаях, когда положительному изменению геомагнитного поля предшествует кратковременное изменение геомагнитного поля обратного знака — предварительный обратный импульс (PRI — preliminary reverse impulse). Результаты изучения этих явлений за более чем столетнюю историю обобщены в обзоре [Curto et al., 2007]. Время нарастания  $H$ -компоненты от начала SSC до его максимума, определенное по данным сети INTERMAGNET, колеблется от 2 до 10 мин при среднем значении 4 мин. В геомагнитных пульсациях откликом на внезапные импульсы являются всплески колебаний в широком диапазоне частот 0.0016–5 Гц, (геомагнитные пульсации Psc1-5).

Оснащение обсерваторий индукционными магнитометрами с высокой чувствительностью и частотой дискретизации до 100 Гц позволяют обнаружить новые особенности внезапных магнитных импульсов. В статьях [Пархомов и др., 2014, 2017] сообщается о кратковременных ( $\leq 20$  с) предвестниках SSC — импульсных всплесках геомагнитных пульсаций в частотном диапазоне 0.2–7 Гц, предвещающих внезапные начала геомагнитных бурь с большой величиной скачка горизонтальной компоненты  $\Delta H$ . Всплески наблюдались преимущественно при северной ориентации вертикальной компоненты межпланетного магнитного поля (ММП). Для обозначения компонент ММП в статье используется солнечно-эклиптическая система координат GSE.

В работе [Пархомов и др., 2014] для изучения характеристик всплесков пульсаций использовались только данные наземных магнитометров и параметры солнечного ветра (СВ). В статье [Пархомов и др., 2017] кроме наземных данных, включающих наблюдения магнитного поля и риометрического поглощения, были привлечены данные о высыпаниях частиц, полученные на низкоорбитальных спутниках POES. Было показано, что начало магнитной бури 17.03.2015 г. предвещалось глобальной генерацией цуга колебаний длительностью  $\sim 4$  с. На дневной стороне этому цугу, в свою очередь, предшествовали высыпания энергичных электронов и протонов, очевидно, связанные с развитием циклотронной неустойчивости во время сжатия магнитосферы.

Характерным признаком всплесков геомагнитных пульсаций, рассмотренных в работах [Пархомов и др., 2014, 2017], является гребнеобразный характер распределения энергии в спектре колебаний. Такое распределение обычно называют спектральной резонансной структурой (СРС) и связывают с наличием в магнитосфере ионосферного альфвеновского резонатора (ИАР) [Поляков, Рапорт, 1981; Belyaev et al., 1989] или с интерференцией прямого и

отраженного от верхней ионосферы сигналов от молниевых разряда [Fedorov et al., 2014]. Особенности морфологии и суточного поведения СРС на разных широтах исследованы в статьях [Bösinger et al., 2002, 2004; Semenova, Yahnin, 2008; Yahnin et al., 2003].

Чтобы понять природу всплеска пульсаций, опережающего классические проявления внезапных магнитных импульсов, опубликованных результатов явно недостаточно. В данной работе мы представляем новые данные, полученные из анализа явлений, сопровождающих положительный магнитный импульс с амплитудой  $\sim 110$  нТл. Этот импульс являлся последним и самым большим из зарегистрированных 21.06.2015 в 16:44 UT (1), 22.06.2015 в 05:44 UT (2) и в 18:33 UT (3) (рис. 1, 2). Указанные импульсы вызваны взаимодействием с магнитосферой трех МУВ [<http://umtof.umd.edu/pm/FIGS.HTML>].

По данным каталога «International Service on Rapid Magnetic Variations» [<http://www.obsebre.es/en/rapid>] все указанные импульсы отнесены к типу SSC. Однако в работе [Громова и др., 2016] первые два импульса отнесены к типу SI, а третий наиболее сильный положительный магнитный импульс ( $\Delta SYM-H \sim 110$  нТл) назван аналогом SC. Во избежание разночтений все три положительных скачка геомагнитного поля, которые наблюдались после контакта с магнитосферой трех МУВ, будем называть магнитными импульсами, нумеруя их по времени наблюдения (рис. 1, 2). В частотном диапазоне геомагнитных пульсаций все импульсы сопровождалось всплесками Psc1-5. Интересующий нас всплеск пульсаций (предвестник) наблюдался в последнем из этих событий, ему будет уделено основное внимание.

## ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Свойства МУВ и некоторые особенности возмущения в магнитосфере определялись по данным спутников WIND, THEMIS, ACE, SOHO, Cluster (C2, C1, C3, C4), SpR (Спектр-Р), GOES-13 и GOES-15 (G13 и G15) и GTL (Geotail) [[https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp\\_public](https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public), <https://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/full>].

Отклик в геомагнитном поле определялся по данным мировых сетей феррозондовых и индукционных магнитометров. В табл. 1 приведены сведения о магнитных обсерваториях, данные которых использовались в статье, типы магнитометров и частоты дискретизации записей каждой обсерватории. На рис. 3 дано географическое положение обсерваторий в моменты наблюдения магнитных импульсов 1–3, вызванных контактами с тремя МУВ.

## ПАРАМЕТРЫ МУВ 21.06.2015 и 22.06.2015 г.

Вариации параметров СВ и ММП перед и за фронтами рассматриваемых МУВ даны на рис. 1. Сверху вниз даны значения индексов геомагнитной активности  $SYM-H$  и  $AE$ , концентрации,  $x$ -компоненты скорости СВ, динамического давления, вертикальной компоненты  $B_z$  и модуля ММП.

Время начала возмущения и положение спутников WIND, Geotail, SpR, THEMIS, G-13, G-15 и RBSP

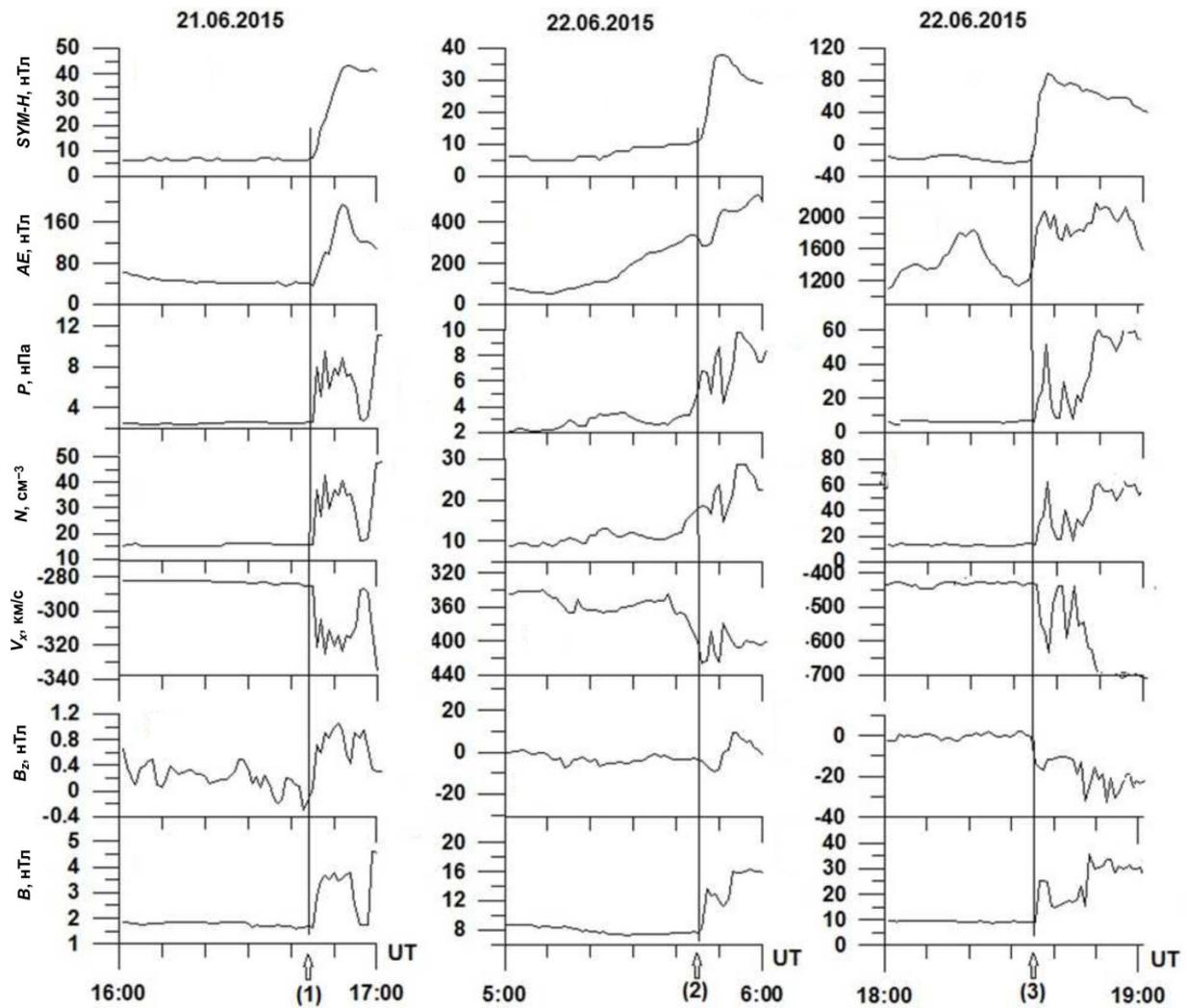


Рис. 1. Вариации параметров СВ и ММП на фронтах трех МУВ и индексы геомагнитной активности по данным OMNI [[https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp\\_public](https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public)]. Вертикальными линиями обозначены моменты внезапных импульсов 16:44 UT 21.06.2015 г. (1), 05:44 UT 22.06.2015 г. (2) и 18:33 UT 22.06.2015 г. (3)



Рис. 2. Магнитная буря, вызванная приходом к Земле трех МУВ. Цифрами обозначены внезапные магнитные импульсы

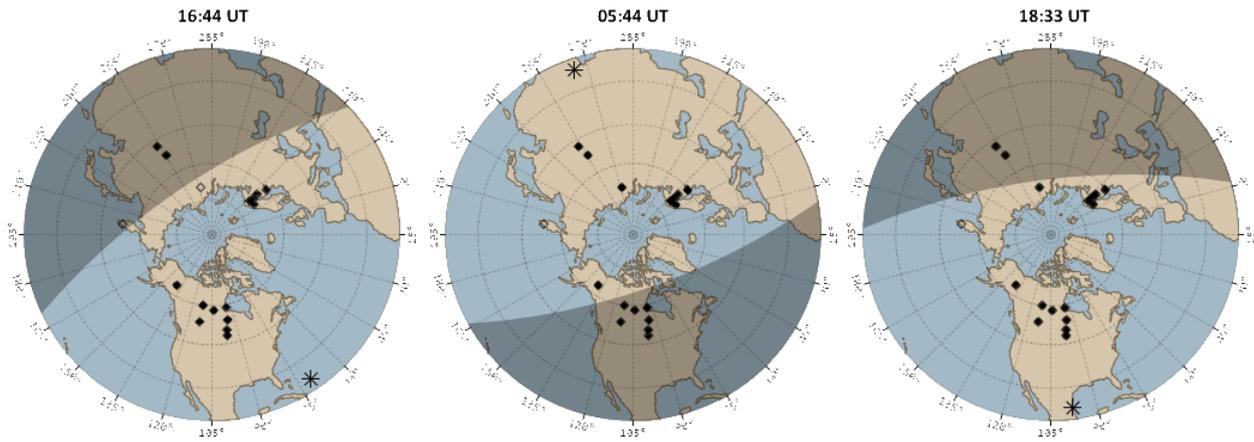


Рис. 3. Географическое положение обсерваторий в моменты наблюдения магнитных импульсов 1–3. Подсолнечная точка обозначена звездочкой.

(А, В) в СВ, переходном слое и внутри магнитосферы во время регистрации третьего магнитного импульса 22.06.2015 г. показаны на рис. 4.

В табл. 2 приведены дата и время наблюдения МУВ, нормали волновых фронтов, определенных геометрическим методом, скорости МУВ,  $\theta(B_n)$  — угол между нормалью к фронту волны и вектором магнитного поля перед фронтом. В скобках указан спутник, с которого взяты измерения магнитного поля. В следующих столбцах даны значения параметров СВ и ММП перед фронтом и за фронтом МУВ и величины скачков параметров.

### ОТКЛИК В ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЯХ НА КОНТАКТ МАГНИТОСФЕРЫ С МУВ

Воздействие МУВ на магнитосферу является причиной возбуждения геомагнитных пульсаций в широком частотном диапазоне, получивших название Psc1-5 [Saito, 1969]. Они являются отражением альфвеновских и магнитозвуковых волн различного вида, возбуждающихся в результате взаимодействия МУВ с магнитосферой и последующего ее сжатия. Закономерности возбуждения геомагнитных пульсаций, причиной которых служат взаимодействия магнитосферы с МУВ и скачками давления СВ описаны во множестве статей и обзоров (например монографии [Нишида, 1980; Леонович, Мазур, 2016], где детально дана теория НЧ-ветви спектра колебаний (0.1–0.0016 Гц); работа [Olson, Lee, 1983]; обзор [Kangas et al., 1998] и монография [Гульельми, 1979], где изложены механизмы генерации ВЧ-части спектра пульсаций 0.1–5 Гц).

На рис. 5 показаны динамические спектры геомагнитных пульсаций Psc1-5, наблюдаемых во время магнитных импульсов, вызванных тремя МУВ. Спектры вычислены для горизонтальной составляющей  $H$  геомагнитного поля с помощью пакета спектрально-временного анализа (СВАН) [Levshin et al., 1968].

Рассмотрим особенности режима геомагнитных пульсаций. Прежде всего видно, что все три события сопровождаются генерацией НЧ-ветви (0.0016–0.05 Гц) спектра колебаний. Число низкочастотных

спектральных компонент наименьшее в первом событии. Первые два импульса, вызванные МУВ, на фронтах которых скачки динамического давления и скорости составляли соответственно  $\Delta P_1=6.9$  нПа,  $V_{1МУВ}=327$  км/с и  $\Delta P_2=6.13$  нПа,  $V_{2МУВ}=440$  км/с, сопровождалась хорошо отождествимыми Psc1-5. В обоих всплесках частота Psc1 не превышала 1 Гц. Кроме того, в первом случае сжатие магнитосферы вызвало нарастание средней частоты пульсаций в диапазоне Psc1, наблюдаемых до импульса от 0.4 до 0.8 Гц, и расширение полосы Psc1 [Olson, Lee, 1983; Kangas et al., 1998]. Во втором случае контакт МУВ с магнитосферой вызвал генерацию колебаний в частотном диапазоне Psc1 на наклонном переднем фронтом нарастания частоты от 0.4 до 0.8 Гц. Свойства таких колебаний в частотном диапазоне Psc1, связанных с внезапными магнитными импульсами и SSC, детально рассматривались в работах [Гульельми, 1979; Safargaleev et al., 2002; Parkhomov et al., 2015]. В целом особенности режима геомагнитных пульсаций, сопровождающих магнитные импульсы 1 и 2 (рис. 5, а), соответствуют известным закономерностям возбуждения пульсаций во время внезапных импульсов и SSC [Saito, 1969, Нишида, 1980; Kangas et al., 1998].

Третья МУВ, распространяющаяся со скоростью 712 км/с, с большими скачками динамического давления ( $\Delta P \sim 50$  нПа) и других параметров СВ и ММП на ее фронте генерировала магнитный положительный импульс большой амплитуды ( $\Delta SYM-H \sim 110$  нТл) (рис. 5, б). До взаимодействия, как и в случаях 1, 2, регистрировались пульсации в частотном диапазоне Psc1 со средней частотой  $\sim 0.3$  Гц, но контакт с МУВ резко изменил режим пульсаций, наблюдавшихся до внезапного магнитного импульса. Главной особенностью взаимодействия является генерация широкополосного всплеска в ВЧ-части спектра 0.5–11 Гц. Всплеск обозначен горизонтальной стрелкой на рис. 5, а (панель 3). Таким образом, анализ откликов в геомагнитных пульсациях на взаимодействие магнитосферы с МУВ указывает на различие режимов геомагнитных пульсаций Psc в зависимости от скачков параметров СВ и ММП на фронтах и скорости распространения МУВ.

Таблица 1

№	Название станции	Географическая широта, град.	Географическая долгота, град.	Тип магнитометра, частота дискретизации
1	Barentsburg (BRB)	70.20°	15.82°	Индукционный, 40 Гц
2	Lovozero (LOZ)	67.97°	35.08°	Индукционный, 40 Гц
3	Uzur (UZR)	52.17°	104.45°	Индукционный, 40 Гц
4	Ulan-Baatar (UBR)	47.54°	106.53°	Индукционный, 64 Гц
5	Norilsk (NOR)	69.35°	88.19°	Индукционный, 64 Гц; феррозонд 1 Гц
6	Paratunka (PET)	52.94°	158.25°	Индукционный, 64 Гц; феррозонд 1 Гц
7	Thief River Falls (THRF)	48.03°	263.64°	Индукционный, 20 Гц
8	Ministik Lake (MSTK)	53.35°	247.03°	Индукционный, 20 Гц; феррозонд 1 Гц
9	Rabbit Lake (RABB)	58.22°	256.32°	Индукционный, 20 Гц; феррозонд 1 Гц
10	Island Lake (ISLL)	53.86°	265.34°	Индукционный, 20 Гц; феррозонд 1 Гц
11	Dawson (DAWS)	64.05°	220.89°	Индукционный, 20 Гц; феррозонд 1 Гц
12	Fort Smith (FSMI)	60.02°	248.05°	Индукционный, 20 Гц; феррозонд 1 Гц
13	Fort Churchill (FCHU)	58.76°	265.92°	Индукционный, 20 Гц; феррозонд 1 Гц
14	Pinava (PINA)	50.20°	263.96°	Индукционный, 20 Гц; феррозонд 1 Гц
15	Ivalo (IVA)	68.56°	27.29°	Индукционный, 40 Гц
16	Kilpisjärvi (KIL)	68.02°	20.79°	Индукционный, 40 Гц
17	Sodankyla (SOD)	67.42°	26.39°	Индукционный, 40 Гц
18	Rovaniemi (ROV)	66.78°	25.94°	Индукционный, 40 Гц
19	Oulu (OUL)	64.52°	27.23°	Индукционный, 40 Гц
20	Nurmijärvi (NUR)	60.50°	24.65°	Индукционный, 40 Гц

Таблица 2

Таблица параметров МУВ

№	Дата	UT	Нормаль GSE	$V_{МУВ}$ , км/с	$\theta(B_n)$	Параметры МУВ			
						см <sup>-3</sup>	нПа	нТл	км/с
1	21.06.2015	16:31:31	-0.756, -0.617, -0.218	327	83 (ТНВ)	$N_{p1}=18.3$ $N_{p2}=54.8$ $\Delta N_p=36.8$	$P_1=2.57$ $P_2=9.47$ $\Delta P=6.9$	$B_1=(-1.39, +0.88, +1.25)$ $B_2=(-3.27, +1.5, +2.87)$ $B_{1i}=2.07$ $B_{2i}=4.6$	$V_{p1}=285$ $V_{p2}=345$ $\Delta V_p=60$
2	22.06.2015	05:35:59	-0.918, -0.394, 0.0348	440	78 (ТНС)	$N_{p1}=11.5$ $N_{p2}=25$ $\Delta N_p=3.5$	$P_1=2.56$ $P_2=8.69$ $\Delta P=6.13$	$B_1=(-5, +7, -1.5)$ $B_2=(-7.5, 13.5, -1)$ $B_{1i}=8.73$ $B_{2i}=15.5$	$V_{p1}=344$ $V_{p2}=430$ $\Delta V_p=86$
3	22.06.2015	18:08:21	-0.919, -0.392, -0.039	712	78 (W)	$N_{p1}=15$ $N_{p2}=60$ $\Delta N_p=45$	$P_1=4.11$ $P_2=50.10$ $\Delta P=46.99$	$B_1=(-2.02, +1.2, -8.13)$ $B_2=(+8, -25, -22)$ $B_{1i}=8.46$ $B_{2i}=26.4$	$V_{p1}=450$ $V_{p2}=700$ $\Delta V_p=250$

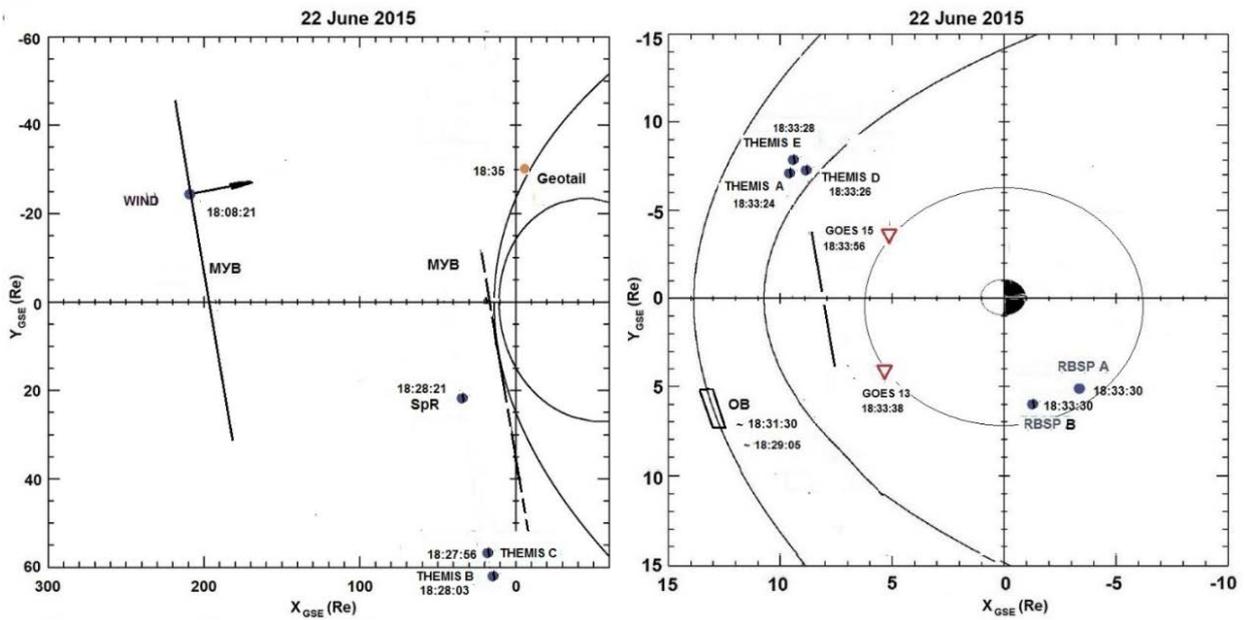


Рис. 4. Положения спутников во время регистрации МУВ 22.06.2015 г. Стрелкой показано направление волновой нормали в 18:08:21 UT. Штриховая линия, параллельная фронту МУВ, нанесена для определения области контакта МУВ с головной ударной волной ГУВ, ОБ — область взаимодействия. Положение ГУВ дано по OMNI [[https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp\\_public](https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public)], положение магнитопаузы рассчитано по модели [Lin et al., 2010]

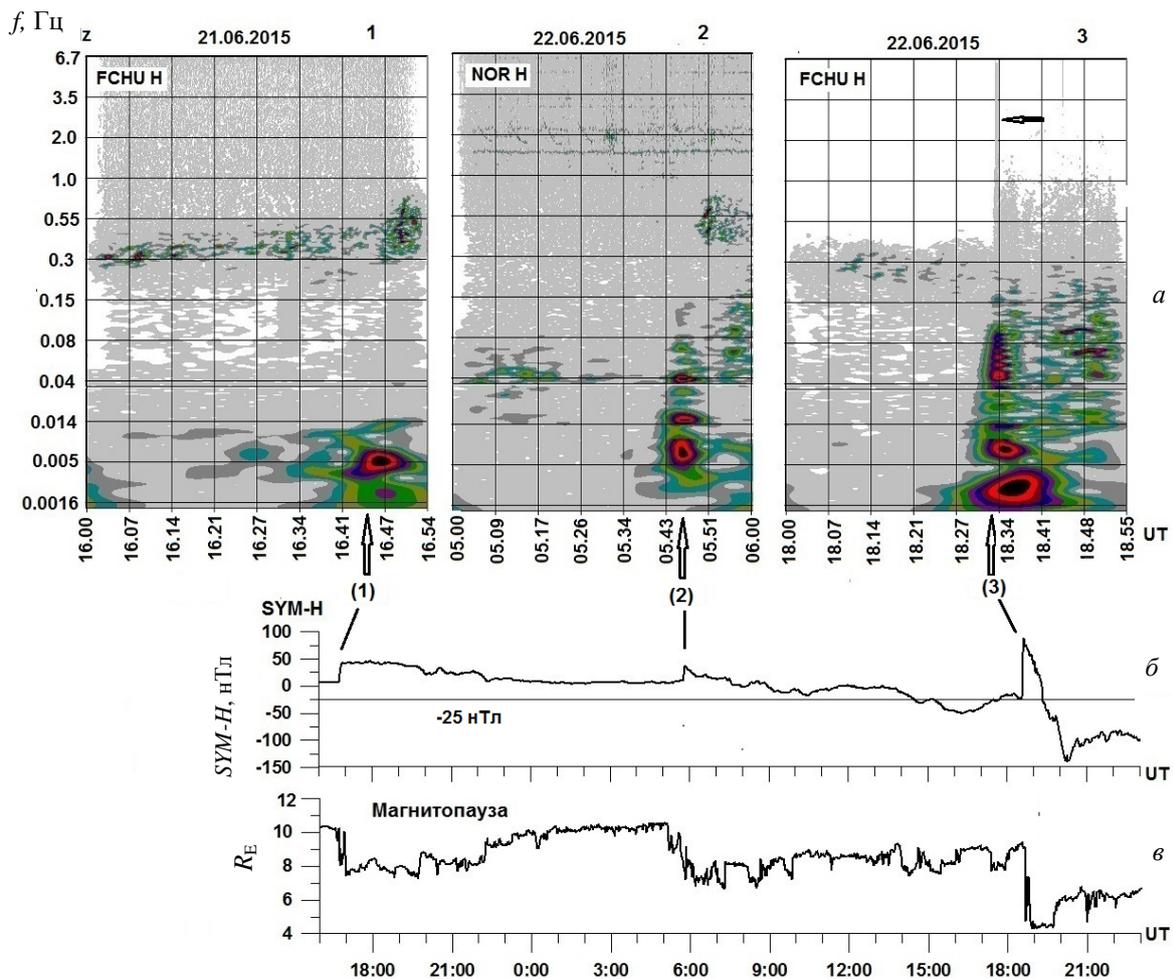


Рис. 5. Динамические спектры геомагнитных пульсаций Psc1-5, сопровождающих магнитные импульсы 21.06.2015 г. и 22.06.2015 г. в обсерваториях, расположенных на близких геомагнитных широтах вблизи полуденного меридиана (а); SYM-H (б); положение подсолнечной точки магнитопаузы, вычисленное по модели [Lin et al., 2010] (в)

## ХАРАКТЕРИСТИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МАГНИТОСФЕРЫ С МУВ, ОТВЕТСТВЕННОЙ ЗА МАГНИТНЫЙ ИМПУЛЬС ОКОЛО ~18:33 UT 22.06.2015 г.

Как видно на рис. 6 а, б, на спутниках SpR и THB, которые находились в СВ на удалении друг от друга (в системе GSE)  $\sim 38R_E$  по координате  $y$  и  $\sim 7R_E$  по координате  $x$  (рис. 4), в  $\sim 18:28:21$  и  $18:28:05$  UT на фронте МУВ в течение 2 с зарегистрированы большие и резкие скачки потока СВ (на  $48 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ ) и модуля ММП (на 20 нТл). Скорость МУВ составила 712 км/с, а волновая нормаль, определенная геометрическим методом с помощью шести космических аппаратов, имела координаты в системе GSE  $n=(-0.919, -0.392, -0.039)$  (показана стрелкой на рис. 4).

Определим область первого контакта МУВ с головной ударной волной (ГУВ). Учитывая ориентацию нормали и тот факт, что МУВ, двигаясь со скоростью 712 км/с, пересекла спутник SpR в  $18:28:21$  UT, можно предположить, что МУВ коснется ГУВ в послеполуденные часы в  $\sim 15$  MLT (рис. 4). Тогда расстояние от спутника до ГУВ порядка  $\sim 21R_E$  МУВ прошла за  $\sim 182$  с. Следовательно, взаимодействие МУВ с отошедшей ГУВ произошло в  $\sim 18:31:30$  UT. Область взаимодействия обозначена на рис. 4 прямоугольником ОВ.

Высокоскоростной поток СВ привел к деформации ГУВ, в результате которой спутники THA, THD, THE, находившиеся до прихода МУВ в переходной области, последовательно оказались в СВ (в  $18:33:47$ ,  $18:33:54$  и  $18:33:57$  UT соответственно) [Cully et al., 2008].

Взаимодействие магнитосферы с МУВ также привело к быстрому смещению магнитопаузы к Земле, что можно определить по данным наблюдений спутников GOES-13, -15 [<https://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/full>]. На геостационарной орбите скачок компоненты магнитного поля  $H_p$ , перпендикулярной плоскости орбиты спутника и направленной на север, т. е. близкой к вертикальной компоненте в системе GSE, на более чем 50 нТл (сжатие магнитосферы), регистрировался на спутнике GOES-13 в  $18:33:38$  UT, а на GOES-15 — в  $18:33:56$  UT (рис. 6 е, ж). Такое различие времен прихода сигнала на спутники означает, что направление распространения возмущения в магнитосфере имеет существенную компоненту вечер — утро. После короткого интервала сжатия произошла смена знака  $H_p$ -компоненты от  $\sim 200$  до  $-200$  нТл. Эта вариация объясняется тем, что токовый слой магнитопаузы сместился к Земле на расстояние менее  $6.6R_E$ , что хорошо согласуется с модельными расчетами (рис. 5, в). Разница во времени признаков прохождения магнитопаузы в данных геостационарных спутников, находящихся примерно на равных расстояниях от линии Земля — Солнце в вечернем и утреннем секторах,

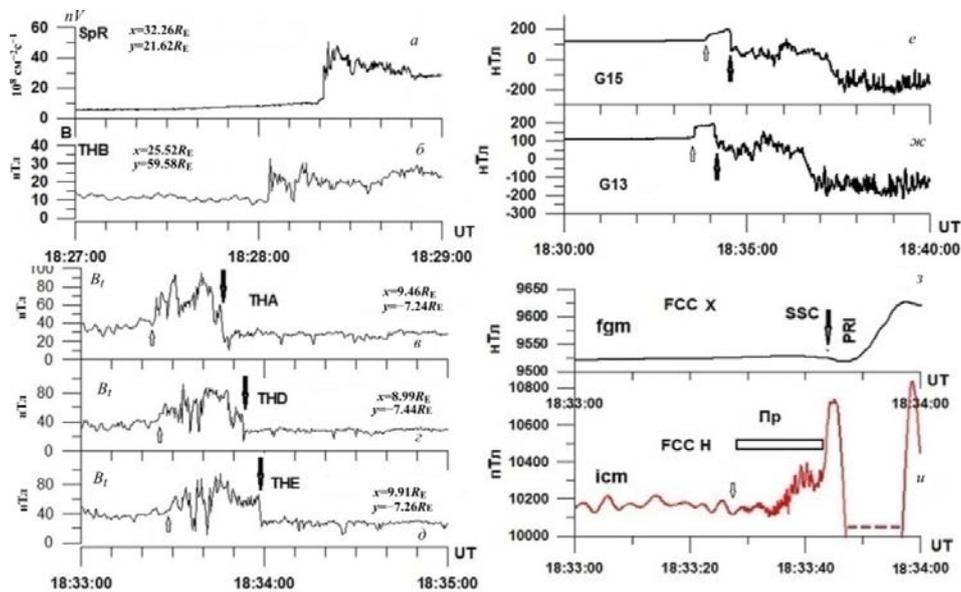


Рис. 6. Вариации параметров СВ, ММП, магнитного поля в переходном слое, геомагнитного поля на геостационарной орбите и наземной обсерватории FCC вблизи полуденного меридиана. Координаты спутников приведены на графиках: а — вариации потока СВ по измерениям на спутнике SpR; б — вариации модуля  $B$  ММП по измерениям на спутнике THB; в — вариации модуля  $B$  в переходном слое по измерениям на спутнике THA; г — то же на спутнике THD; д — то же на спутнике THE (светлые стрелки на панелях означают начало возмущения на спутниках, темные стрелки на панелях в-д указывают момент выхода спутников в СВ в результате смещения к Земле ГУВ и магнитопаузы); е, ж — вариации  $H_p$ -компоненты геомагнитного поля на синхронной орбите (светлыми стрелками обозначено начало магнитного импульса на спутниках GOES-13 и GOES-15, жирными стрелками — начало вариаций, связанных с проходом магнитопаузы через спутники); з, и — вариации геомагнитного поля, зарегистрированные феррозондовым (fgm) (частота дискретизации 1 Гц) и индукционным (icm) магнитометрами (частота дискретизации 20 Гц) в обсерватории FCC. Стрелкой PRI обозначено начало изменения  $x$ -компоненты — начало предварительного обратного импульса, Пр — предвестник магнитного импульса (высокочастотные колебания убывающей частоты)

согласуется с тем, что фронт возмущения в СВ и в переходной области распространялся с вечерней стороны магнитосферы (рис. 4).

Рассмотрим наземные магнитные наблюдения в высокоширотной обсерватории FCC, находящейся вблизи полуденного меридиана, на магнитометрах двух типов — феррозондовом и индукционном (рис. 6, з, и). На магнитограмме феррозондового магнитометра (дискретизация 1 с) видно, что вариация магнитного поля состоит из предварительного обратного импульса (PRI) с амплитудой  $\sim 15$  нТл (стрелка в 18:33:42 UT на рис. 6, з) и резкого положительного нарастания магнитного поля в 18:33:49 UT (магнитного импульса). Значение  $x$ -компоненты на магнитограмме INTERMAGNET (дискретизация 1 мин) обсерватории «Форт Черчиль» изменялось от 9517 нТл в 18:33 до  $\sim 10188$  нТл в 18:36 UT. На осциллограмме индукционного магнитометра с 18:33:27 до 18:33:44 UT (рис. 6, и) виден пакет колебаний, обозначенный Пр, с нарастанием периода к его окончанию. Начало колебаний в пакете (стрелка на рис. 6, и), явно опережает начало магнитного импульса. В работах [Пархомов и др., 2014, 2017] такой пакет рассматривался как предвестник внезапного импульса, который можно было классифицировать как SSC. Заметим, что в нашем случае магнитный импульс наблюдается на фоне развития главной фазы магнитной бури. Тем не менее, ему также соответствует предвестник в геомагнитных пульсациях.

Таким образом, отклик в геомагнитном поле на третью МУВ включает в себя предвестник в виде пакета колебаний с падающей частотой в частотном диапазоне 0.5–11 Гц, опережающий магнитный импульс — начало резкого роста  $H$ -компоненты и предварительного отрицательного обратного импульса геомагнитного поля, по которому определяется начало магнитного импульса на Земле. Интересно, что предвестник опережает и начало резкого изменения геомагнитного поля на синхронной орбите. Эту особенность мы обсудим позже.

### ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ВСПЛЕСКА КОЛЕБАНИЙ (ПРЕДВЕСТНИКА)

На рис. 7, а, б приведены динамические спектры предвестника в  $D$ -составляющей в обсерваториях сети CARISMA (DAWS, FCHU), расположенных во время регистрации третьего магнитного импульса вблизи полуденного меридиана, и обсерватории «Паратунка» (PET, Камчатка) [Shiokawa et al., 2010] в утренние часы. Спектры вычислены с помощью стандартной функции Spectrogram пакета MATLAB для оценки спектральной плотности мощности с предварительным исключением линейного тренда (рис. 7, а) и пакета СВАН [Levshin et al., 1968] спектрально-временного анализа (рис. 7, б). В спектрах во временном интервале 18:33:30–18:33:50 UT выделяется всплеск в диапазоне частот 0.5–8 Гц. Видно,

что колебания с падающей частотой начинались одновременно в обсерваториях сети CARISMA примерно в 18:33:27 UT на частоте  $\sim 8$  Гц. К концу пакета частота падает до  $\sim 0.5$  Гц. Станции сети CARISMA располагались в это время в полуденном секторе. В обсерватории PET верхняя частота составила  $\sim 4$  Гц.

Похожие спектры сигналов-предвестников магнитного импульса наблюдались во всех обсерваториях сети CARISMA, расположенных в дневном секторе магнитосферы (рис. 7, в).

Главные особенности спектров, полученных двумя способами, — одновременность генерации обсуждаемых сигналов, их одинаковая длительность во всех обсерваториях, падение частоты к концу всплеска и спектральная резонансная структура (CPC). При этом на СВАНграммах CPC видна более отчетливо. Положение спектральных максимумов меняется по частоте от обсерватории к обсерватории. В спектре  $D$ -составляющей обсерватории PET, которая находится в момент регистрации всплеска в утреннем секторе (8.30 MLT), верхняя частота всплеска ( $\sim 4$  Гц) ниже, чем во всех остальных обсерваториях (рис. 7 а, б). Основная энергия сигнала приходится на 0.4–5 Гц — частоты ионосферного альфвеновского резонатора (ИАР) [Belyaev et al., 1989; Поляков, Рапопорт, 1981] и на 0.15–0.3 Гц — частоты надionoсферного альфвеновского резонатора [Dovbnya et al., 2013].

Подобные закономерности в динамических спектрах предвестника третьего магнитного импульса видны в обсерваториях в вечернем секторе магнитосферы (Финская меридиональная цепочка магнитометров и магнитометр Полярного геофизического института в Баренцбурге) (рис. 8 б, в). Здесь, так же как и на дневной стороне магнитосферы, всплеск имеет совпадающие в обсерваториях начала и длительность пакета, падение частоты к концу пакета и резонансную структуру. Частотный диапазон всплесков шире в  $H$ -компоненте и занимает полосу 0.5–11 Гц. В  $D$ -компоненте полоса частот уже, и верхняя частота не превышает  $\sim 5.6$  Гц. Частота спектральных максимумов зависит от положения обсерватории. Различие в ширине спектров в обсерваториях может быть связано с различием используемой частоты дискретизации индукционных магнитометров: 20 Гц на сети CARISMA и 40 Гц на Финской меридиональной сети.

В обсерваториях KIL, IVA, SOD и наиболее явно в обсерватории OUL всплеск геомагнитных пульсаций начинается на частоте  $\sim 11$  Гц, а первый спектральный максимум наблюдается на частоте 10 Гц, так же как и в авроральной обсерватории NOR, которая расположена вблизи полуночного меридиана. В  $D$ -компоненте можно отметить ослабление интенсивности сигнала на самой северной станции Баренцбург. Подобная закономерность прослеживается и в паре обсерваторий Норильск — Улан-Батор в около-полуночные часы (рис. 9).

Спектральный максимум всплесков на частоте  $\sim 3.1$  Гц наблюдается во всех обсерваториях Финской

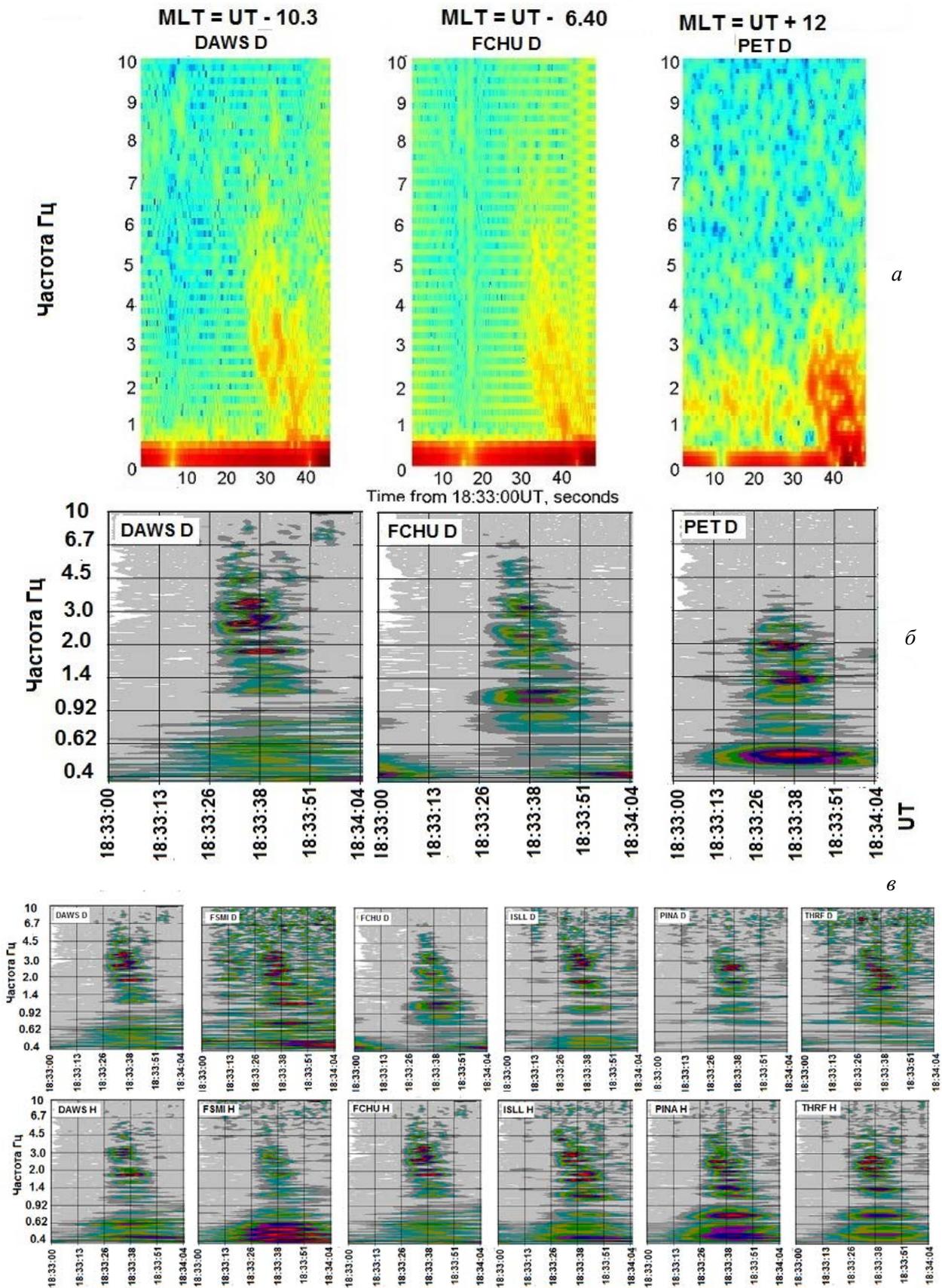


Рис. 7. Динамические спектры всплеска-предвестника третьего магнитного импульса, зарегистрированного наземными обсерваториями, вычисленные с помощью программ пакетов MATLAB (а) и СВАН (б); спектры, полученные с помощью СВАН по данным обсерваторий дневного сектора (сеть CARISMA) 22.06.2015 г. (в)

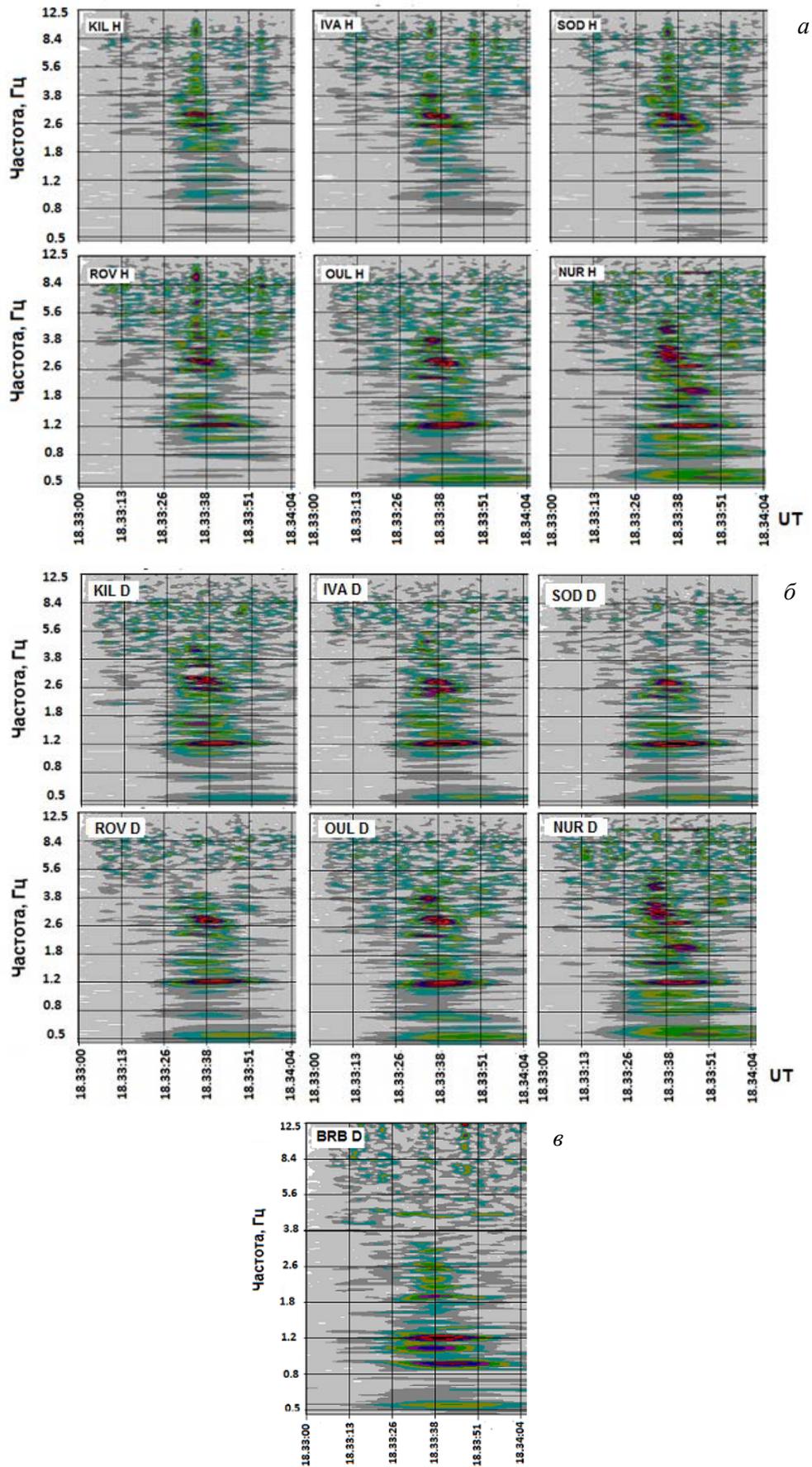


Рис. 8. Динамические спектры  $H$ -компоненты (а) и  $D$ -компоненты (б) в обсерваториях вечернего сектора магнитосферы (Финская меридиональная цепочка магнитометров); в —  $D$ -компоненты по данным магнитометра Полярного геофизического института в Баренцбурге

цепочки в  $H$ -компоненте и в обсерваториях дневной стороны. В  $D$ -компоненте во всех обсерваториях вечернего сектора виден спектральный максимум на частоте 1.2 Гц. На этой же частоте наблюдается спектральный максимум в обсерваториях вблизи полуночного меридиана (рис. 9).

Такие же закономерности в динамических спектрах всплеска геомагнитных пульсаций (предвестника магнитного импульса) видны в среднеширотной и высокоширотной обсерваториях в ночном секторе магнитосферы ( $88^\circ$ – $106^\circ$ ) (рис. 9). В Норильске структура всплеска подобна спектрам в вечернем секторе и наивысшая частота здесь также достигает  $\sim 11$  Гц.

Суммируем наблюдаемые свойства всплеска пульсаций — предвестника третьего магнитного импульса в рассматриваемых событиях.

1. Всплески пульсаций наблюдаются глобально в частотном диапазоне 0.2–11 Гц.
2. В далеко отстоящих обсерваториях примерно совпадают начала всплесков, длительность цуга колебаний, наблюдается падение частоты колебаний к концу пакета.
3. Во всех обсерваториях наблюдается СРС.

## РЕЗУЛЬТАТЫ УЗКОПОЛОСНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Задержки сигналов в далеко отстоящих обсерваториях определялись после применения к данным цифровой фильтрации в узкой полосе частот  $\Delta f = 0.2 \div 0.8$  Гц (рис. 10, *a–в*). Фильтры созданы на основе алгоритма Марме, который не искажает фазовую характеристику сигнала [Marmet, 1979].

Видно, что осциллограммы отфильтрованных сигналов подтверждают убывание частоты к концу всплеска — всплеск начинается на высоких частотах, затем появляются все более низкие. Подтверждается и опережение предварительного импульса — фрагменты записей феррозондового магнитометра показаны на рис. 10, *б*. Отфильтрованные записи поддерживают также описанную частотную динамику сигнала, видную на динамических спектрах тех же обсерваторий (рис. 10, *в*). Отфильтрованные осциллограммы разнесенных по долготе обсерваторий (наибольшее расстояние  $\sim 105^\circ$ ) на двух центральных частотах 0.5 и 1.2 Гц показаны на рис. 11 с большим временным и амплитудным разрешением для определения запаздывания распространения сигналов.

Для оценки возможной задержки распространения сигнала между долготно-разнесенными обсерваториями выполнено сравнение отфильтрованных сигналов на двух частотах. Как видно на рис. 11, задержки на частотах 0.5 и 1.2 Гц не наблюдаются (в работе [Пархомов и др., 2017] задержка между станциями дневного и ночного секторов составляла до 4 с).

## СВЯЗЬ ПРЕДВЕСТНИКА С ПОГЛОЩЕНИЕМ КОСМИЧЕСКИХ ШУМОВ

Развитие внезапных магнитных импульсов часто сопровождается высыпанием энергичных электронов

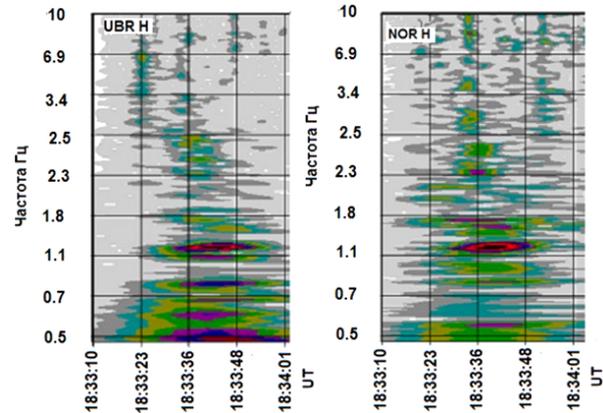


Рис. 9. Динамические спектры пульсаций в среднеширотной и высокоширотной обсерваториях ночного сектора магнитосферы в Улан-Баторе и Норильске

нов, вызывающих поглощение космического радишума (риометрическое поглощение) [Нишида, 1980]. Рассмотрим особенности связи всплеска-предвестника в геомагнитных пульсациях с поглощением космических шумов по 10-секундным данным риометра и магнитометров обсерватории OULU. На рис. 12 представлены фрагменты записи риометра (*a*), магнитограммы феррозондового (*б*) и индукционного (*в*) магнитометров и осциллограмм сигналов, отфильтрованных в двух частотных диапазонах, с центральной частотой 0.5 и 4.2 Гц обсерватории OULU в вечерние часы местного времени (MLT  $\sim 19:30$ ). Время наблюдения пакета затухающих колебаний с СРС обозначено прямоугольником. Спектр этих колебаний приведен на рис. 8.

На рис. 12, *в* (осциллограмма индукционного магнитометра) с 18:33:28 UT виден цуг флуктуаций магнитного поля, который и является предвестником магнитного импульса (выделен прямоугольником). В 18:34:00 UT начинается предварительный обратный импульс (PRI) (рис. 12, *б*), начало которого совпадает с началом аврорального поглощения (рис. 12, *a*), вызванного высыпаниями энергичных электронов вследствие начала сжатия магнитосферы. Важно, что усиление поглощения начинается после окончания пакета в 18:34:00 UT. Приведенные данные показывают, что пакет колебаний примерно на полминуты опережает начало риометрического поглощения и PRI. Подобное соотношение между всплеском колебаний в герцовом диапазоне и началом риометрического поглощения имеет место и в обсерваториях сети CARISMA в дневные часы местного времени (данные не показаны).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Приведенные в данной работе сведения являются, по нашему мнению, убедительным доказательством существования предвестника магнитного импульса в виде всплеска пульсаций в диапазоне  $\sim 0.5$ – $11$  Гц. Надо заметить, что это событие в некоторых аспектах отличается от рассмотренного, например, в работе [Пархомов и др., 2017], где было высказано предпо-

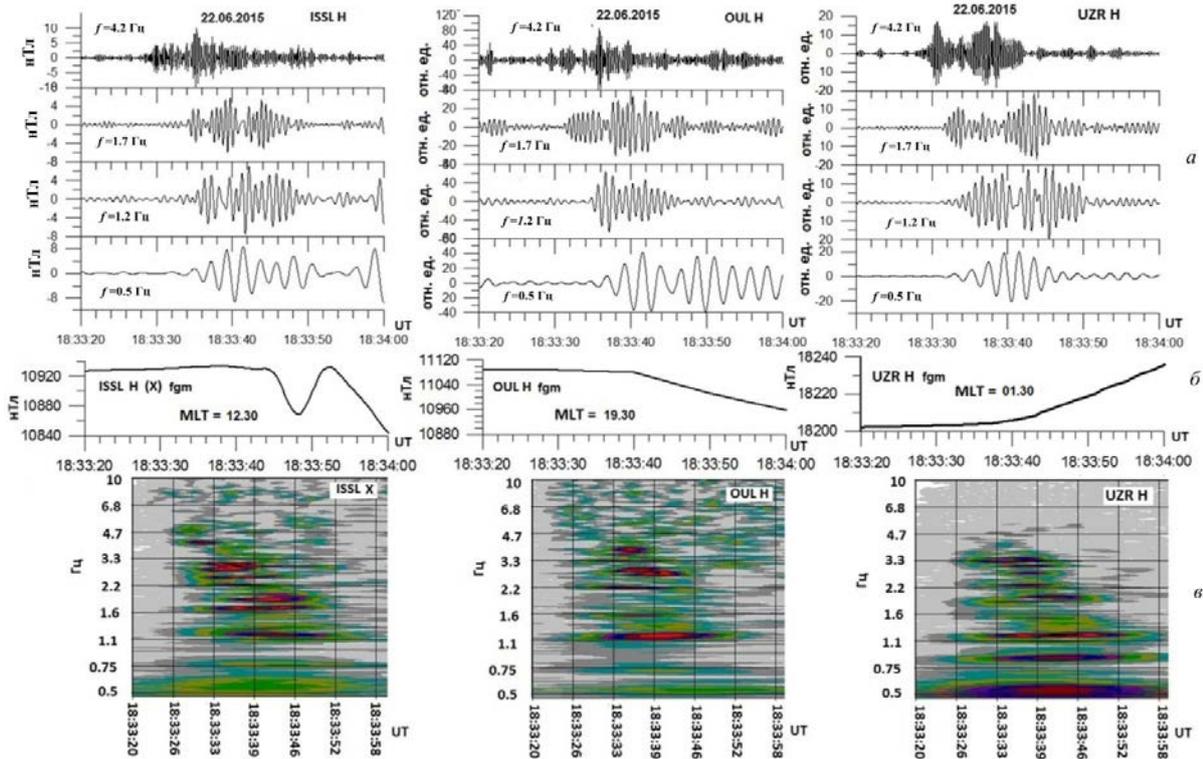


Рис. 10. Осциллограммы пакета, отфильтрованные узкополосными фильтрами, на центральных частотах 4.2, 1.7, 1.2 и 0.5 Гц (а); фрагмент магнитограмм, полученных на феррозондовых магнитометрах, здесь же указано местное время обсерваторий (б); динамические спектры, вычисленные по программе СВАН (в)

ложение, что такой всплеск является следствием распространения электромагнитной ионно-циклотронной волны из области сжатия магнитосферы, где во время сжатия обычно происходит резкое увеличение анизотропии энергичных протонов (см., например, [Olson, Lee, 1983]). Генерация ионно-циклотронной неустойчивости происходит вначале на дневной стороне и затем вследствие распространения волны сжатия в хвост магнитосферы может смещаться к ночной стороне. Задержка регистрации цуга колебаний от дневной стороны к ночной (до 4 с) действительно наблюдалась [Пархомов и др., 2017]. Рассмотренный здесь случай характеризуется отсутствием заметных задержек при переходе от дневной стороны к ночной.

В этом случае можно предположить распространение сигнала в волноводе Земля — ионосфера, аналогичное тому, которое имеет место во время Q-всплесков, связанных с молниевыми разрядами [Науакэва et al., 2002; Nickolaenko, Науакэва, 2002].

На аналогию с Q-всплесками указывает вид спектра колебаний в его высокочастотной части. Заметим, что авторы работы [Fedorov et al., 2014] предложили механизм формирования отклика геомагнитного поля в герцовом диапазоне на молниевый разряд в виде всплеска, спектр которого содержит резонансную структуру. Мы предполагаем, что роль молниевых разрядов в нашем случае может играть электромагнитный импульс, вызванный резким высыпанием частиц в ионосферу из области сжатия магнитосферы при первоначальном контакте МУВ с магнитосферой. Это высыпание и связанная с ним

импульсная модификация параметров ионосферы, может быть кратковременным и не привести к заметным последствиям, таким как рост риометрического поглощения и формирование магнитного PRI. Последние, по-видимому, обусловлены вторжениями частиц из сжатой магнитосферы уже после установления ее новой конфигурации.

Поскольку высыпание энергичных электронов вдоль силовых линий происходит за время порядка секунд, рассмотренное нами явление предвестника может служить индикатором первого контакта МУВ с магнитосферой. Разумеется, предложенная интерпретация является предварительной и нуждается в проверке и более весомых доказательствах.

Причиной высыпаний из области сжатия магнитосферы может быть циклотронная неустойчивость. Действительно, синхронно со сжатием магнитосферы, зарегистрированным на геостационарных спутниках GOES (рис. 6 е, ж), эти спутники зарегистрировали возрастание потоков электронов в широком диапазоне энергий (данные здесь не приводятся), что, наряду с ростом поперечной анизотропии потоков частиц, связанным со сжатием магнитного поля, способствует развитию неустойчивости.

Как уже отмечалось, предвестник в рассматриваемом случае наблюдался раньше, чем сжатие магнитного поля на геостационарной орбите. Это согласуется с предположением, что причиной предвестника является высыпание частиц сразу после первого контакта МУВ с магнитопаузой, который произошел, когда магнитопауза еще находилась на расстоянии порядка  $(9-10)R_E$ . Рассмотренный здесь

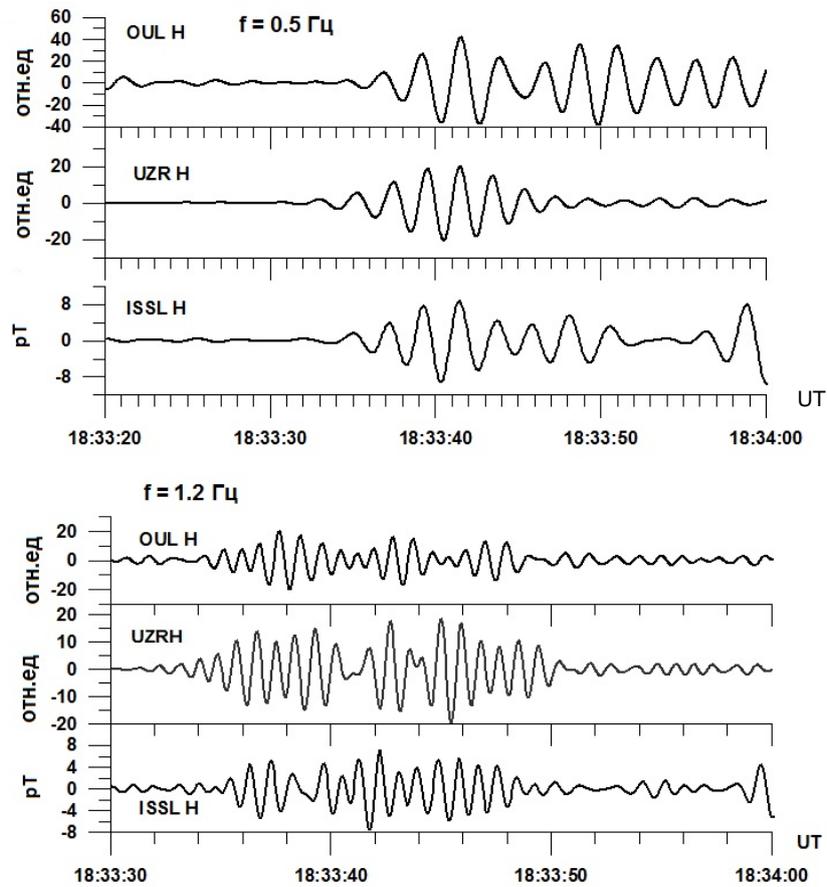


Рис. 11. Осциллограммы отфильтрованного сигнала на двух частотах по данным обсерваторий на трех долготах

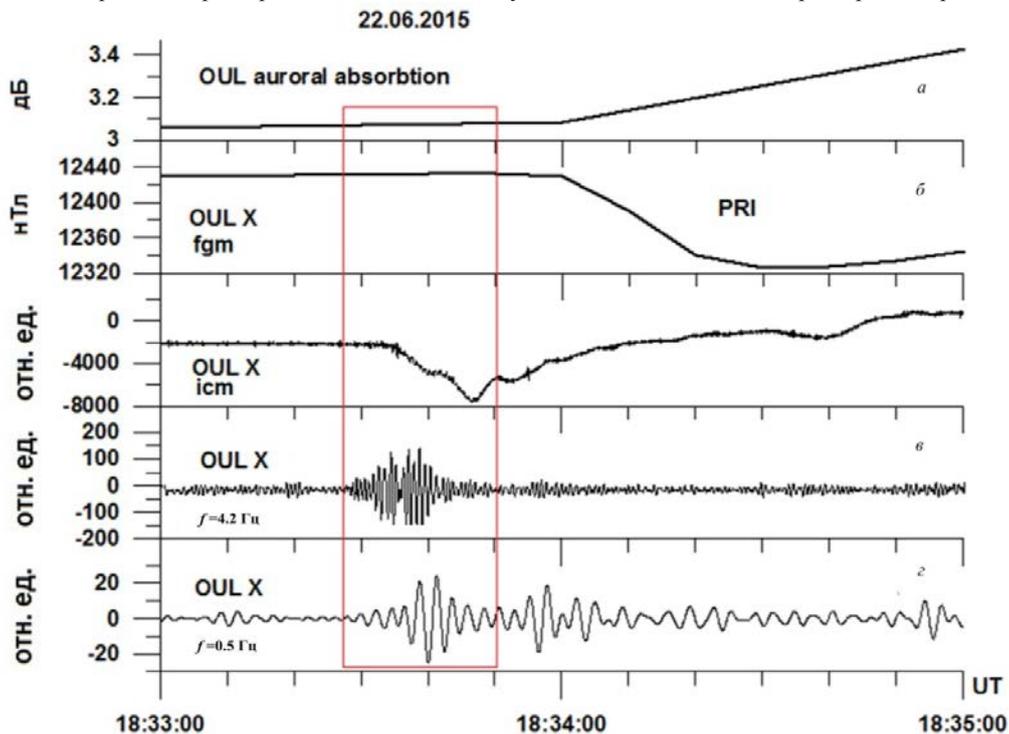


Рис. 12. Фрагменты записи риометра (а), магнитограммы феррозондового магнитометра (б), осциллограммы индукционного магнитометра (в), осциллограммы отфильтрованного сигнала с центральными частотами 4.2 Гц (г) и 0.5 Гц (д) в обсерватории OULU в вечернем секторе

предвестник отличается от предвестника, рассмотренного в работе [Пархомов и др., 2017], еще и тем, что на низких частотах <2 Гц наблюдается запаздывание сигнала относительно высокочастотной части спектра. Причина такой дисперсии частоты остается непонятной, и здесь мы ограничимся лишь констатацией этого факта. Таким образом, хотя совокупность рассмотренных данных определенно указывает на наличие нового элемента в развитии комплекса явлений, связанных с магнитными импульсами (см., также работы [Пархомов и др., 2014, 2017; Parkhomov et al., 2016]), природа этого явления остается во многом неясной. Предполагается проведение дополнительных исследований.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы сравнили отклик в геомагнитных пульсациях, сопровождающих развитие трех внезапных импульсов геомагнитного поля, которые, в свою очередь, были вызваны взаимодействием с магнитосферой трех МУВ 21–22.06.2015 г. Два первых импульса были вызваны МУВ, которые распространялись со скоростью менее 500 км/с. Скачки динамического давления на фронтах этих волн составляли около 7 нПа. Импульсы магнитного поля, соответствующие этим МУВ, сопровождалась широкополосными всплесками пульсаций Psc1-5, морфологические характеристики и механизмы возбуждения которых достаточно полно описаны в многочисленных статьях, обзорах и монографиях.

Третья МУВ имела существенно большую скорость (720 км/с) и существенно больший скачок давления на фронте волны (~50 нПа). Соответствующий импульс геомагнитного поля имел амплитуду около 110 нТл и развивался на фоне главной фазы геомагнитной бури. Показано, что этому всплеску предшествовал так называемый предварительный обратный импульс, перед которым, в свою очередь, наблюдался цуг геомагнитных пульсаций длительностью ~20 с. Спектр этого цуга пульсаций имел вид всплеска в частотном диапазоне 0.5–11 Гц с выраженной резонансной структурой и падением частоты к окончанию всплеска. При этом не было обнаружено существенных задержек в регистрации этого всплеска на широко разнесенных станциях в различных секторах MLT.

Анализ этого и некоторых других событий [Пархомов и др., 2014, 2017; Parkhomov et al., 2016] показывает, что в случаях сжатия магнитосферы при взаимодействии с МУВ с резким фронтом и большими скачками параметров плазмы на фронтах первым признаком такого взаимодействия может быть не сам внезапный импульс магнитного поля, а описанный выше широкополосный всплеск геомагнитных пульсаций в герцовом диапазоне.

Данные спутников ACE, WIND, Geotail, Cluster, THEMIS и NOAA GOES-13, -15 получены через базу данных NASA CDAWeb. Авторы благодарят руководителей, разработчиков приборов и руководителей экспериментов, проводимых на этих спутниках, за возможность использования данных. Ав-

торы выражают благодарность I.R. Mann, D.K. Milling и другим работникам команды CARISMA за использование данных (CARISMA управляется Университетом Альберты, финансируется Канадским космическим агентством). Авторы благодарят также сотрудников Института космических исследований за возможность использования данных спутника Спектр-Р. Данные индукционных магнитометров обсерваторий Узур и Норильск получены с использованием оборудования магнитометрического комплекса Центра коллективного пользования «Ангара» Института солнечно-земной физики СО РАН, данные обсерватории Баренцбург — Полярным геофизическим институтом, а данные Финской сети индукционных магнитометров и риометров — Геофизической обсерваторией Соданкюля. Работа В.А. Пархомова поддержана грантами РФФИ 16-02-00669 и № 18-55-52006 МНТг; работа Б. Цэгмэда поддержана грантом АН Монголии ШУАГ\_2017/17 и проектом Министерства образования, науки и спорта Монголии ШУСС-2017/65; работа С.Ю. Хомутова поддержана темой № АААА-А17-117080110043-4 от 01.08.2017 г.; работа Н.Л. Бородковой частично поддержана грантами РФФИ 16-02-00669 и 16-02-00125; работа А.Г. Яхнина и Т. Райта поддержана грантом Академии наук Финляндии № 294931; работа А.А. Мочалова выполнялась в рамках темы госзадания № АААА-А 18-118012490100-7. Измерения с помощью индукционного магнитометра обсерватории «Паратунка» выполняются в рамках Соглашения по академическому обмену между ИКИР ДВО РАН и Исследовательским институтом Нагойи (Япония) при поддержке проекта RWING (JSPS KAKENHI 16H06286).

Авторы благодарят В.Г. Еселевича, А.С. Леоновича и А.Г. Демехова за полезные обсуждения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Громова Л.И., Клейменова Н.Г., Левитин А.Е. и др. Дневные геомагнитные возмущения в высоких широтах во время сильной магнитной бури 21–23 июня 2015 года: начальная фаза бури // Геомагнетизм и аэрономия. 2016. Т. 56, № 3. С. 302–313. DOI: [10.7868/S0016794016030056](https://doi.org/10.7868/S0016794016030056).
- Гульельми А.В. МГД-волны в околоземной плазме. М.: Наука, 1979. 140 с.
- Леонович А.С., Мазур В.А. Линейная теория МГД-колебаний магнитосферы. М.: Физматлит, 2016. 317 с.
- Нишида А. Гидромагнитный диагноз магнитосферы. М.: Мир, 1980. 299 с.
- Пархомов В.А., Довбня Б.В., Бородкова Н.А. и др. Импульсные всплески геомагнитных пульсаций в частотном диапазоне 0.2–7 Гц как первый сигнал о взаимодействии межпланетных ударных волн с магнитосферой Земли // Солнечно-земная физика. 2014. Вып. 25. С. 21–28.
- Пархомов В.А., Бородкова Н.Л., Яхнин А.Г. и др. Глобальный импульсный всплеск геомагнитных пульсаций в частотном диапазоне 0.2–5 Гц как предвестник внезапного начала геомагнитной бури Святого Патрика 17.03.2015 // Космические иссл. 2017. № 4. С. 321–334.
- Поляков С.В., Рапопорт В.О. Ионосферный альфвеновский резонатор // Геомагнетизм и аэрономия. 1981. Т. 21, № 5, С. 610–614.
- Belyaev P.P., Polyakov S.V., Rapoport V.O., Trakhtengerts V.Y. Experimental studies of resonance structure in the

spectrum of atmospheric electromagnetic background noise in the range of short-period geomagnetic pulsations // *Radio-physics and Quantum Electronics*. 1989. V. 32. P. 491–498.

Bösinger T., Haldopis C., Belyaev P.P., et al. Spectral properties of the ionospheric Alfvén resonator as observed at a low latitude station (L=1.3) // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107, N A10. DOI: [10.1029/2001JA005076](https://doi.org/10.1029/2001JA005076).

Bösinger T., Demekhov A.G., Trakhtengerts V.Y. Fine structure in ionospheric Alfvén resonator spectra observed at low latitude (L=1.3) // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. L18802. P. 1281. DOI: [10.1029/2004GL020777](https://doi.org/10.1029/2004GL020777).

Cully C.M., Ergun R.E., Stevens K., et al. The THEMIS Digital Fields Board // *Space Sci. Rev.* 2008. V. 141, iss. 1–4. P. 343–355.

Curto J.J., Araki T., Alberca L.F. Evolution of the concept of sudden storm commencements and their operative identification // *Earth, Planets and Space*. 2007. V. 59, N 11. P. i–xii.

Dovbnaya B.V., Guglielmi A.V., Potapov A.S., Kline B.I. On the existence of an over ionospheric Alfvén resonator // *Solar-Terr. Phys.* 2013. Iss. 22. P. 12–15.

Fedorov E., Schekotov A., Hobara Y., et al. The origin of spectral resonance structures of the ionospheric Alfvén resonator. Single high-altitude reflection or resonant cavity excitation? // *J. Geophys. Res.* 2014. V. 119. P. 3117–3129. DOI: [10.1002/2013JA019428](https://doi.org/10.1002/2013JA019428).

Hayakawa M., Nickolaenko A.P., Ogawa T., Komatsu V. Q-bursts waveforms: model and experiment // *Telecommunications and Radio Engineering* 2002. V. 69(19). P. 1735–1750. DOI: [10.1615/TelecomRadEng.v.69.i19.50](https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v.69.i19.50).

Kangas J., Guglielmi A., Pokhotelov O. Morphology and physics of short-period magnetic pulsations (A review) // *Space Sci. Rev.* 1998. V. 83. P. 435–512.

Levshin A.A., Frantsuzova V.I., Shkadinskaya G.V. Spectral-temporal analysis of seismic wave // *Computer seismology*. 1968. V. 4. P. 197.

Lin R.L., Zhang X.X., Liu S.Q., et al. A three-dimensional asymmetric magnetopause model // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115, iss. 4. CiteID A04207. DOI: [10.1029/2009JA014235](https://doi.org/10.1029/2009JA014235).

Marmet P. New digital filter for analysis of experimental data // *Rev. of Scientific Instruments*. 1979. V. 50, N 1. P. 79–83.

Nickolaenko A.P., Hayakawa M. Resonances in the Earth — Ionosphere Cavity. Cluver Academic Publishing. Dordrecht, Neerland. 2002. 380 p.

Olson J.V., Lee L.G. Pc1 wave generation by sudden impulses // *Planet. Space Sci.* 1983. V. 31, N 3. P. 295–302.

Parkhomov V.A., Dmitriev A.V., Tsegmed B. On the origin of burst Pc1 pulsations produced in interaction with an oblique interplanetary shock // *Planet. Space Sci.* 2015. V. 109–110, N.1. P. 21–31.

Parkhomov V.A., Dovbnaya B.V., Borodkova N.L., et al. Impulse Bursts of Geomagnetic Pulsations as the Ground Signature of Contact of Interplanetary Irregularity with the Dayside Magnetopause. Open Access Library J. 2016. 3: e2493. DOI: [10.4236/oalib.1102493](https://doi.org/10.4236/oalib.1102493).

Safargaleev V., Kangas J., Kozlovsky A.Q., Vasilyev A. ULF noise excited by sudden solar wind dynamic pressure // *Annales Geophys.* 2002. V. 20. P. 1751–1761.

Saito T. Geomagnetic pulsations // *Space Sci. Rev.* 1969. V. 10, N 3. P. 319–412.

Semenova N.V., Yahnin A.G. Diurnal behaviour of the ionospheric Alfvén resonator signatures as observed at high latitude observatory Barentsburg (L=15) // *Ann. Geophys.* 2008. V. 26. P. 2245–2251.

Shiokawa K., Nomura R., Sakaguchi K., et al. The STEL induction magnetometer network for observation of high-frequency geomagnetic pulsations // *Earth, Planets and Space*. 2010. V. 62, iss. 6. P. 517–524.

Yahnin A.G., Semenova N.V., Ostapenko A.A., et al. Morphology of the spectral resonance structure of the electro-

magnetic background noise in the range of 0.1–4Hz at L = 5.2 // *Ann. Geophys.* 2003. V. 21. P. 779–786.

URL: <http://umtof.umd.edu/pm/FIGS.HTML> (дата обращения 16 августа 2018 г.).

URL: <http://www.obsebre.es/en/rapid> (дата обращения 16 августа 2018 г.).

URL: <https://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/full> (дата обращения 16 августа 2018 г.).

URL: [https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp\\_public](https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public) (дата обращения 16 августа 2018 г.).

## REFERENCE

Belyaev P.P., Polyakov S.V., Rapopor V.O., Trakhtengerts V.Y. Experimental studies of resonance structure in the spectrum of atmospheric electromagnetic background noise in the range of short-period geomagnetic pulsations, *Radiophysics and Quantum Electronics*. 1989, vol. 32, pp. 491–498.

Bösinger T., Haldopis C., Belyaev P.P., Yakunin M.N., Semenova N.V., Demekhov A.G., Angelopoulos V. Spectral properties of the ionospheric Alfvén resonator as observed at a low latitude station (L=1.3). *J. Geophys. Res.* 2002, vol. 107, no. A10, pp. 1281. DOI: [10.1029/2001JA005076](https://doi.org/10.1029/2001JA005076).

Bösinger T., Demekhov A.G., Trakhtengerts V.Y. Fine structure in ionospheric Alfvén resonator spectra observed at low latitude (L=1.3). *Geophys. Res. Lett.* 2004, vol. 31, L18802. DOI: [10.1029/2004GL020777](https://doi.org/10.1029/2004GL020777).

Cully C.M., Ergun R.E., Stevens K., Nammari A., Westfall J. The THEMIS Digital Fields Board. *Space Sci. Rev.* 2008, vol. 141, iss. 1–4, pp. 343–355.

Curto J.J., Araki T., Alberca L.F. Evolution of the concept of sudden storm commencements and their operative identification. *Earth, Planets and Space*. 2007, vol. 59, no. 11, pp. i–xii.

Dovbnaya B.V., Guglielmi A.V., Potapov A.S., Kline B.I., On the existence of an over ionospheric Alfvén resonator. *Solar-Terrestrial Phys.* 2013, iss. 22, pp. 12–15.

Fedorov E., Schekotov A., Hobara Y., Nakamura R., Yagova N., Hayakawa M. The origin of spectral resonance structures of the ionospheric Alfvén resonator. Single high-altitude reflection or resonant cavity excitation? *J. Geophys. Res.* 2014, vol. 119, pp. 3117–3129. DOI: [10.1002/2013JA019428](https://doi.org/10.1002/2013JA019428).

Gromova L.I., Kleimenova N.G., Levitin A.E., Gromov S.V., Dremukhina L.A., Zelinsky N.P. Daytime geomagnetic disturbances in high latitudes during a strong magnetic storm on June 21–23, 2015: the initial phase of the storm. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy], 2016, vol. 56, no. 3, pp. 302–313. DOI: [10.7868/S0016794016030056](https://doi.org/10.7868/S0016794016030056). (In Russian).

Guglielmi A.V. *MGD-volny v okolozemnoi plazme* [MHD waves in near-Earth plasma]. Moscow, Science Publ. 1979. 140 p. (In Russian).

Hayakawa M., Nickolaenko A.P., Ogawa T., Komatsu V. Q-bursts waveforms: model and experiment. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2002, vol. 69(19), pp.1735–1750. DOI: [10.1615/TelecomRadEng.v.69.i19.50](https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v.69.i19.50).

Kangas J., Guglielmi A., Pokhotelov O. Morphology and physics of short-period magnetic pulsations (A Review). *Space Science Rev.* 1998, vol. 83, pp. 435–512.

Leonovich A.S., Mazur V.A. *Lineinaya teoriya MGD-kolebanii magnitosfery*. [The linear theory of MHD oscillations of the magnetosphere]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2016, 317 p. (In Russian).

Levshin A.A., Frantsuzova V.I., Shkadinskaya G.V. Spectral-temporal analysis of seismic wave. *Computer seismology*. 1968, vol. 4, p. 197. (In Russian).

Lin R.L., Zhang X.X., Liu S.Q., Wang Y.L., Gong J.C. A three-dimensional asymmetric magnetopause model. *J. Geophys. Res.* 2010, vol. 115, A04207. DOI: [10.1029/2009JA014235](https://doi.org/10.1029/2009JA014235).

- Marmet P. New digital filter for analysis of experimental data. *Rev. of Scientific Instruments*. 1979, vol. 50, no. 1, pp. 79–83.
- Nishida A. 1980. *Geomagnitnyi diagnost magnitosfery* [Geomagnetic diagnosis of the magnetosphere]. Moscow, Mir Publ., 299 p. (In Russian).
- Nickolaenko A.P., Hayakawa M. *Resonances in the Earth — Ionosphere cavity*. Cluver Academic Publishing, Dordrecht, Neederland, 2002, 380 p.
- Olson J.V., Lee L.G. Pc1 wave generation by sudden impulses. *Planet. Space Sci.* 1983, vol. 31, no.3, pp.295–302.
- Parkhomov V.A., Dovbnya B.V., Borodkova N.L., Safargaleyev V.V., Pashinin A.Y. Pulse bursts of geomagnetic pulsations in 0.2–7 Hz frequency range as a first signal of interaction between interplanetary shock waves and the magnetosphere. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terr. Phys]. 2014, iss. 25, pp. 21–28. (In Russian).
- Parkhomov V.A., Dmitriev A.V., Tsegmed B. On the origin of burst Pc1 pulsations produced in interaction with an oblique interplanetary shock. *Planet. Space Sci.* 2015, vol. 109–110, no.1, pp. 21–31.
- Parkhomov V.A., Dovbnya B.V., Borodkova N.L., Dmitriev A.V., Safargaleyev V.V., Pashinin A.Y. Impulse Bursts of Geomagnetic Pulsations as the Ground Signature of Contact of Interplanetary Irregularity with the Dayside Magnetopause. *Open Access Library J.* 2016, 3: e2493. DOI: [10.4236/oalib.1102493](https://doi.org/10.4236/oalib.1102493).
- Parkhomov V.A., Borodkova N.L., Yakhnin A.G., Suvorova A.V., Dovbnya B.V., Pashinin A.Y., Kozelov B.V. Global pulse burst of geomagnetic pulsations in 0.2–5 Hz frequency range as a precursor of sudden commencement of St. Patric geomagnetic storm on 17.03.2015. *Kosmicheskie issledovaniya*. [Cosmic Res.] 2017, no. 4, pp. 321–334. (In Russian).
- Polyakov V.O., Rapoport V.Y. Ionospheric Alfvén resonator. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 1981, vol. 21, no. 5, pp. 610–614. (In Russian).
- Safargaleyev V., Kangas J., Kozlovsky A.Q., Vasilyev A. ULF noise excited by sudden solar wind dynamic pressure. *Annales Geophys.* 2002, vol. 20, pp. 1751–1761.
- Saito T. Geomagnetic pulsations. *Space Sci. Rev.* 1969, vol. 10, no. 3, pp. 319–412.
- Semenova N.V., Yakhnin A.G. Diurnal behaviour of the ionospheric Alfvén resonator signatures as observed at high latitude observatory Barentsburg (L=15). *Ann. Geophys.* 2008, vol. 26, pp. 2245–2251.
- Shiokawa K., Nomura R., Sakaguchi K., Otsuka Y., Hamaguchi Y., Satoh M., Katoh Y., Yamamoto Y., Shevtsov B.M., Smirnov S., Poddelsky I., Connors M. The STEL induction magnetometer network for observation of high-frequency geomagnetic pulsations. *Earth, Planets and Space*. 2010, vol. 62, pp. 517–524.
- Yakhnin A.G., Semenova N.V., Ostapenko A.A., Kangas J., Manninen J., Turunen T. Morphology of the spectral resonance structure of the electromagnetic background noise in the range of 0.1–4 Hz at L = 5.2. *Annales Geophysicae*. 2003, vol. 21, pp. 779–786.  
URL: <http://umtof.umd.edu/pm/FIGS.HTML> (accessed August 16, 2018).  
URL: <http://www.obsebre.es/en/rapid> (accessed August 16, 2018).  
URL: <https://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/full> (accessed August 16, 2018).  
URL: [https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp\\_public](https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public) (accessed August 16, 2018).

*Как цитировать эту статью*

Пархомов В.А., Бородкова Н.Л., Яхнин А.В., Торо Райта, Цэгмэд Б., Хомутов С.Ю., Пашинин А.Ю., Чиликин В.Э., Мочалов А.А. Два типа отклика магнитосферы в геомагнитных пульсациях Psc на взаимодействие с межпланетными ударными волнами. *Солнечно-земная физика*. 2018. Т. 4, № 3. С. 68–83. DOI: [10.12737/szf-43201808](https://doi.org/10.12737/szf-43201808).